

Helymeghatározás mobil térképező rendszerben

Barsi Árpád¹, Lovas Tamás¹, Charles K. Tóth²



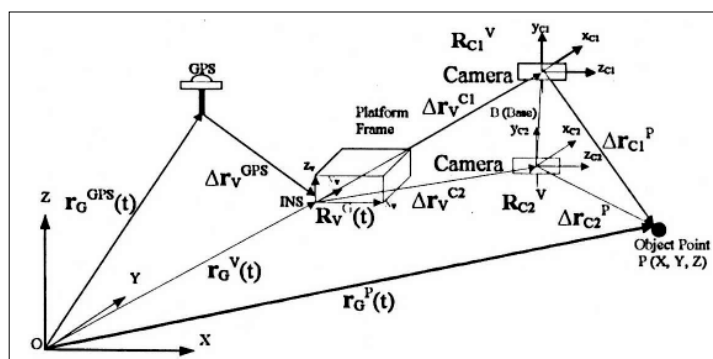
1. A mobil térképező rendszerek

A mérés-technika és eszköztára folyamatos fejlődésének köszönhetően egyre kisebbek, kisebb fogyasztásúak és nagyobb teljesítményűek, pontosabbak a mérőműszereink. Ennek a fejlődésnek révén alakultak a mozgó (mobil) térképező rendszerek (*mobile mapping system*). A mozgó rendszert hordozó berendezés sokféle lehet: légi (repülőgép, helikopter), vízi (hajó, csónak) vagy szárazföldi (autó, teherautó stb.) közlekedési jármű, de akár egy ember, állat is.

E rendszerek többnyire két fő komponensből állnak: navigációs érzékelők és térképező (attribútum) érzékelők [1].

A navigációs összetevő többnyire GPS-alapú, amelyet inerciális navigációs berendezéssel (INS) egészítenek ki. A műszer-együttes így nem csupán a rendszer helyét (pozícióját), hanem annak helyzetét (tájékozását vagy tájolását) is képes egyidejűleg meghatározni.

A térképező szenzor pedig – ami lehet például kamera, lézertáv mérő, radar vagy hangerősség, útegyenetlenség, gázkoncentráció stb. érzékelő – folyamatosan rögzíti az attribútum adatokat. A rendszer attribútum-érzékelői által mért adato-



1. ábra A mobil térképezés alapelve [1]

kat a navigációs rendszer időadataival együtt kell rögzíteni, majd szinkronizálni. Megjegyezzük, hogy ez a szinkronizáció kritikus lehet, és már kisebb pontatlanság is jelentős feldolgozási hibákhoz vezethet.

A mobil térképezés alapelve az 1. ábra segítségével mutatjuk be. Az ábrán látható rendszerben két kamera gyűjti a térképező adatokat, a navigációra GPS/INS együttes szolgál.

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

² The Ohio State University Center for Mapping

A kamerák helyét a következő összefüggés alapján számíthatjuk:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_G^{C1}(t) &= \mathbf{r}_G^V(t) + \mathbf{R}_V^G(t) \cdot \Delta \mathbf{r}_V^{C1} \\ \mathbf{r}_G^{C2}(t) &= \mathbf{r}_G^V(t) + \mathbf{R}_V^G(t) \cdot \Delta \mathbf{r}_V^{C2} \end{aligned} \quad (1),$$

ahol $C1$ és $C2$ jelöli a két kamerát, $\mathbf{r}_G^{C1}(t)$ és $\mathbf{r}_G^{C2}(t)$ a kamerák helye vektoros formában, globális koordináta rendszerben, t időpillanatban, $\mathbf{r}_G^V(t)$ a járművön elhelyezett navigációs rendszer kezdőpontjának helye t időpillanatban, $\Delta \mathbf{R}_V$ a jármű helyzetének forgatási mátrixa – szintén t időpillanatban –, $\Delta \mathbf{r}_V$ a járművön elhelyezett kamera külpontossága (eltolása). Az (1) összefüggésben minden időponthoz tartozik tehát egy helyzetvektor és egy forgatási mátrix, amelyekben szerepelnek a térbeli x , y , z koordináták, illetve a koordináta tengelyek körüli φ , ω , κ elfordulási szögek. Látható, hogy a két kamera $\Delta \mathbf{r}_V$ eltolása nem időfüggő, vagyis egy kalibrációs folyamatban meghatározható.

Amennyiben ismerjük a kamerák helyét és helyzetét, ismertek a kalibrációs adatok is, valamint megmértük a kamerák képein a tárgyponthoz képpontkoordinátáit, az alábbi képlet segítségével a tárgyponthoz globális koordinátáit kapjuk meg:

$$\mathbf{r}_G^P(t) = \mathbf{r}_G^{C1}(t) + \mathbf{R}_V^G(t) \cdot \mathbf{R}_{C1}^V \cdot \Delta \mathbf{r}_{C1}^P \quad (2),$$

ahol $\mathbf{r}_G^P(t)$ a tárgyponthoz globális koordinátái az időfüggvényében, $\mathbf{r}_G^{C1}(t)$ az első kamera helyvektora az időfüggvényében, globális koordináta rendszerben, $\mathbf{R}_V^G(t)$ a jármű helyzetének forgatási mátrixa az időfüggvényében, $\mathbf{R}_{C1}^V(t)$ a kamera helyzetének forgatási mátrixa a jármű rendszeréhez képest, $\Delta \mathbf{r}_{C1}^P$ a tárgyponthoz képpontkoordinátái az első kamera képén. Értelemszerűen hasonló összefüggés írható fel a második kamerára is [1].

A térképező adatok folyamatos rögzítésével és azok koordinátáinak számításával a mobil térképező rendszer széles sebességtartományban képes a felhasználó számára szükséges adatokat (mondjuk a képen látható lényeges objektumokat, pl. jelzőtáblákat) térbelileg vonatkoztatni (georeferálni).

Az attribútum adatok gyűjtésének részleteivel az egyes adatnyerési módszerek kapcsán lehet találkozni; jelen cikkünkben a mobil térképezés navigációs komponensére koncentrálunk.

2. Helymeghatározás GPS/INS-szel

A mobil térképező rendszerek helymeghatározó rendszerei GPS alapúak. A mobil térképezés által megkövetelt pontossági igények miatt szinte kizárólag DGPS technológiát alkalmaznak, azaz

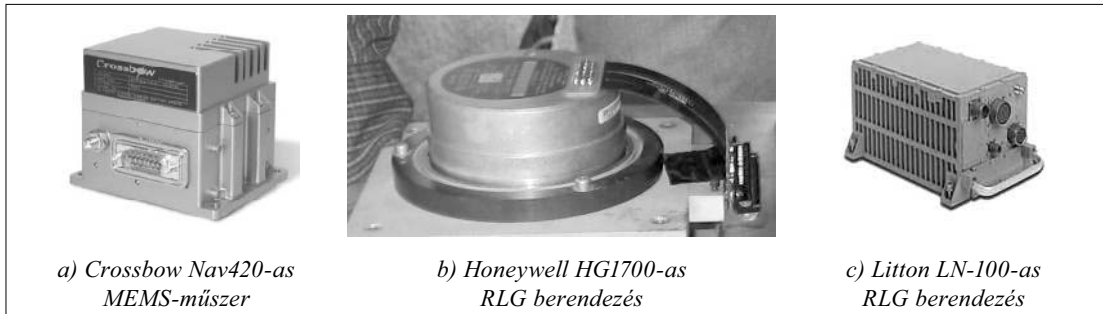
a járművön elhelyezett vevőn kívül szükség van egy bázis állomásra is. A GPS jelek folyamatos vétele városi környezetben nem mindig biztosított (pl. a városi kanyon effektus hatásai miatt), ezért ilyen körülmények között kiegészítő megoldásokra van szükség. A jel terjedését az épített környezet, a domborzat és a vegetáció is befolyásolhatja. Időszakos elvesztés esetén az INS szolgáltatotta adatok átmeneti időre biztosítják, hogy a jármű mozgását követni tudjuk.

A GPS mérőrendszerekről közismert továbbá, hogy az elérhető legnagyobb mérési frekvencia 20 Hz (noha 5 Hz feletti megoldásoknál erős a koordináták közötti korreláció), tehát elvileg másodpercenként 20-szor tudjuk meghatározni a (mozgó) vevő helyét. A mobil térképező rendszerek használatakor igen gyakran ez a magasabb frekvencia sem elegendő, hiszen például óránként 60 km-es sebességgel haladó jármű esetén 4 Hz-es vevővel csak ~4,2 m-enként számítható pozíció. Útállapot felmérő rendszer tehát ennél a frekvenciánál csak mintegy 4 méterenként képes a burkolatról adatot szolgáltatni úgy, hogy annak a helyét is közvetlenül megadja.

A GPS mérés másik „hiányossága”, hogy csak a vevő helyét méri, annak térbeli irányát nem. Szerencsére inerciális navigációs rendszerrel kombinálva lehetséges mindkét hátrányos hatást jelentősen csökkenteni.

Az inerciális navigációs rendszer (*Inertial Navigation System – INS*) egy inerciális mérőegységet (*Inertial Measurement Unit – IMU*) és hozzá tartozó vezérlő/feldolgozó szoftverkörnyezetet tartalmaz. A mérőegységeknek két fő csoportja alakult ki: a mozgó (főként mechanikus) giroszkópokat tartalmazó és a rögzített érzékelőn alapuló (elektronikus) berendezésekre. Ez utóbbiak a korszerűbb, nagyobb pontosságú berendezések. A rögzített (*strap-down*) inerciális mérőegységet tartalmazó eszközöknek (IMU) három ismertebb típusa létezik: a *MEMS* (*Micro Electro Mechanical System – Mikroelektro-mechanikai rendszer*), a *FOG* (*Fiber Optic Gyro – Üvegszál-optikás giroszkóp*) és az *RLG* (*Ring Laser Gyro – Gyűrűs lézergiroszkóp*). A MEMS érzékelők a Föld mágneses erőterének erővonalait is érzékelik, a FOG és RLG-műszerekben pedig optikai szálakba vezetett fénnel végzik a méréseket. A FOG és RLG műszerek jóval pontosabbak és kevésbé érzékenyek a környezeti hatásokra, mint a MEMS-berendezések.

A 2. ábrán három IMU-egységet mutatunk be; a baloldali MEMS-elven működik, a középső



a) Crossbow Nav420-as
MEMS-műszer

b) Honeywell HG1700-as
RLG berendezés

c) Litton LN-100-as
RLG berendezés

2. ábra Inerciális mérőegységek (IMU)

1. táblázat

és a jobboldali pedig egy-egy FOG-érzékelő.

Az inerciális navigáció során azt az egyszerű fizikai tényt használjuk ki, hogy a gyorsulás, a sebesség és az elmozdulás között differenciális (integrál) kapcsolat írható fel.

Az IMU-k nemcsak a berendezés gyorsulását, hanem annak szögváltozását (szögsebességét) is mérik, szintén mindhárom koordinátatengely

körül. Az így kapott \vec{g} vektor három eleme és a három gyorsulásérték jelentik a mérési eredményeket [3]. Fontos megemlíteni, hogy a navigációs egyenletekben szerepel a gravitáció is, ezért a gravitációs mező pontos ismerete lényeges. Egyes navigációs berendezésekben nem a teljes térbeli megoldást, hanem csupán kétdimenziós változatát támogatják; ilyenek például a kisebb pontosságú közúti, illetve vízi célokra fejlesztett rendszerek.

A 2. ábrán látható rendszerek néhány fontosabb műszaki adatát az 1. táblázat mutatja.

A GPS és az INS mérések feldolgozása a gyakorlatban szinte kizárólag Kálmán Rudolf által kidolgozott eljárás, az ún. Kálmán-szűrő segítségével történik. A Kálmán-szűrőről kiváló irodalom áll rendelkezésre [1, 3]. A GPS berendezés és az INS összekapcsolásának alapvetően kétféle módja ismeretes; ennek megfelelően írják a Kálmán-szűrőket is: laza (*loosely coupled*) és szoros (*tightly coupled*) kapcsolat. Az első esetben a szűrőbe a GPS-mérésekből képzett *double difference* és az INS által mért gyorsulások mennek be, míg a második változatban viszont két navigációs megoldás. Előbbinél pozícióval vagy távolságméréssel segített INS rendszerről beszélhetünk.

Név	Kategória	Giroszkóp	Gyorsulásmérő
Crossbow NAV420	kereskedelmi (M)	torzítás = 1°/sec véletlen bolyongás = 2,25°/h skálatényező = 1%	torzítás = 8,5 mg skálatényező = 1%
Honeywell HG1700	taktikai (R)	torzítás = 2°/h véletlen bolyongás = 0,125°/h skálatényező = 150 ppm	torzítás = 1 mg skálatényező = 300 ppm
Litton LN-100	navigációs (R)	torzítás = 0,003°/h véletlen bolyongás = 0,001°/h skálatényező = 1 ppm	torzítás = 25 µg skálatényező = 40 ppm

A bemutatott IMU-k fontosabb műszaki adatai [4]
MEMS (M), RLG (R)

3. Mérés mobil térképező rendszerrel

2005 októberében többnapos méréseket végeztünk az Ohio Állami Egyetem (*The Ohio State University*) Center for Mapping központja által kifejlesztett GPSVan™ berendezéssel. A terepjáróból átalakított mérőjármű a 3. ábrán látható.

Vizsgálataink idejére a jármű fedélzetén az alábbi műszerek kerültek elhelyezésre:

- Novatel OEM4 GPS,
- Topcon Legacy GPS,
- Trimble 4700 GPS,
- Honeywell HG1700 INS,
- Honeywell H764G-1 INS,
- Honeywell H764G-2 INS,
- Litton LN-100 INS.

A DGPS számításokhoz az Ohio Állam területén, a Közlekedési Minisztérium (ODOT) által működtetett, 100 km-nél sűrűbben elhelyezkedő permanens állomás hálózat, a CORS (*Continuously Operating Reference Stations*) egyik állomását használtuk fel. Ezen kívül egyidejűleg működött a Center tetején elhelyezett bázisállomás is. Ezt az egységet ellenőrzésre használtuk.

A méréshez az egyetemi campus területén egy megközelítően félórás tesztutat terveztünk,



3. ábra A OSU Center for Mapping által fejlesztett GPSVan™ kívülről (a) és részlet a belsejéből, ahol négy IMU szenzor látható (b)

amely különböző GPS vételi feltételeket biztosító területeken vezetett keresztül, és többszöri ismételt mérést tudunk végrehajtani. A méréshez a GPS-vevők másodpercenként rögzítik a méréseket, az INS berendezések közül a HG1700-as 100 Hz-el, az LN-100-as 256 Hz-el, a H764G műszerek 200 Hz-el rögzítettek. A 30 perces mérés alatt közel 1,5 millió rekordot rögzített a három fedélzeti számítógép. A GPS-vevők közös antennát használtak. Az IMU berendezések mechanikailag merev keretre voltak felszavarozva, így ugyanazokat a hatásokat érzékelték.

A feldolgozás során elsősor az adatok kiolvasása és mentése történt meg. Ezt követően a GPS-vevők méréseit egységesen RINEX-formátumra konvertáltuk, majd letöltöttük az interneten is

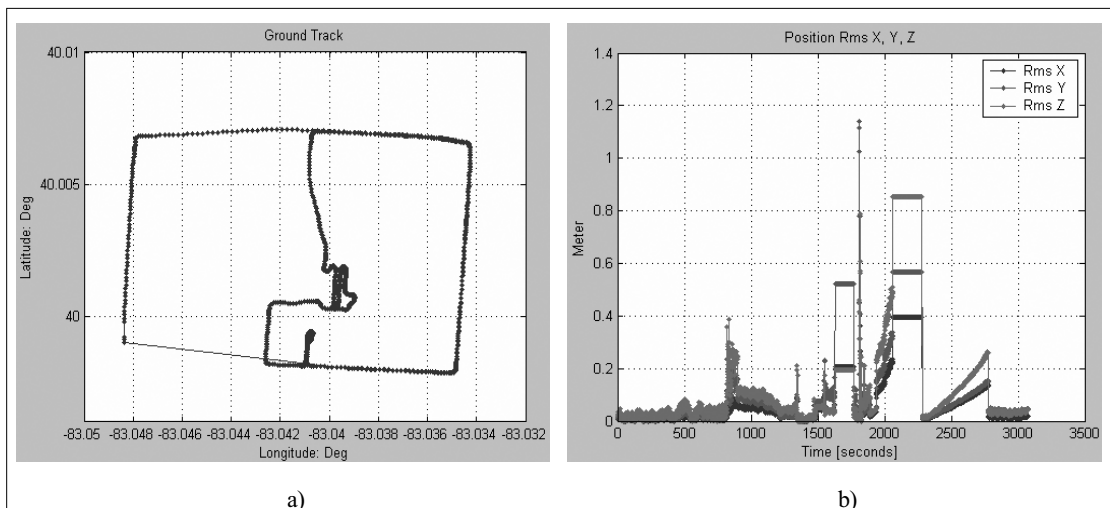
elérhető CORS permanens állomás adatait a műholdak pontos ephemerisz adataival együtt.

A számítások első lépésében a KARS (*Kinematic And Rapid Static*) programcsomagot [5, 6] használtuk. Ennek a csomagnak a részét képező KINPOS alkalmazás számította ki a jármű GPS pozícióit. Ezeket a koordinátákat csak a GPS-mérések alapján határoztuk meg.

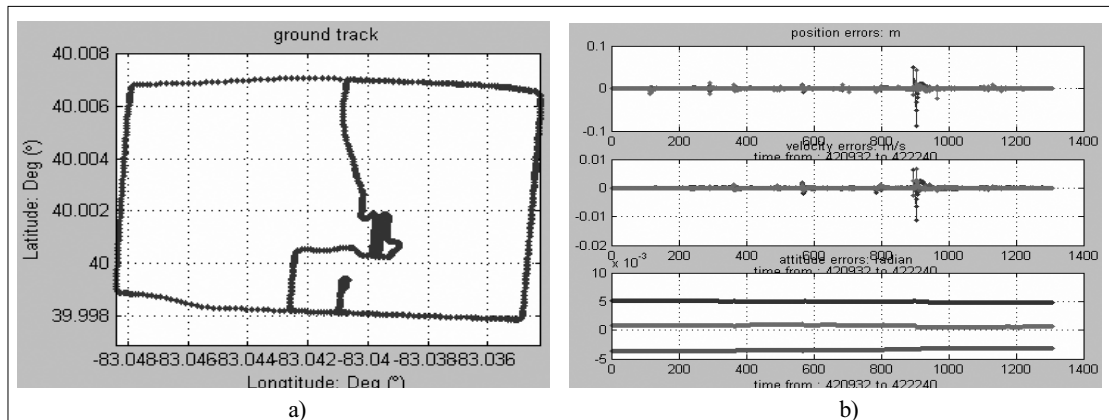
A 4. ábrán látható a GPS-pontok által kirajzolt trajektória, valamint a számítás pontosságát mutató RMS-hibaábra.

Megállapítható, hogy a számított pozíciók RMS-hibája többnyire 20 centiméter alatti, de a legnagyobb hiba értéke meghaladja az 1 métert.

A második számítási blokkban az INS-mérések kerültek sorra. Ekkor a Center-ben kifejlesztett szoros GPS/IMU-csatolású AIMS (Airborne



4. ábra A DGPS-mérések alapján számított trajektória (a) és a számítás RMS-hibái (b)



5. ábra A Kálmán-szűrővel kapott trajektória (a) és a számítás hibaábrája (b)

Integrated Mapping System) feldolgozó program végezte el a Kálmán-szűrést. Az AIMS eredetileg légi navigációhoz készült, de sikeresen használható felszíni körülmények között is. Az LN100-as érzékelő méréseinek felhasználásával végzett feldolgozás eredménye az 5. ábrán látható.

Erdemes összehasonlítani, hogy mennyiben változik a trajektória az INS-mérések figyelembevételével. Jól észrevehető, hogy a trajektória bal alsó szakaszán (4.a ábra) a pusztán GPS megoldás nem adott értékelhető pontokat, így az ábrán egyenes köti össze a pontokat. Ezen a szakaszon a GPS-holdak láthatósága korlátozott volt a fák miatt. Az INS segítségével viszont szépen megoldható volt a navigációs feladat. Az összehasonlítás során látszik az is, hogy a pozíciók meghatározási pontossága jelentősen javult pontos INS bevonásával. Az RMS-hibáknak a kritikus szakaszon elért – 1 métert meghaladó – értéke az INS-seknek köszönhetően 10 cm alá esett (5.b ábra felső grafikonja). A második esetben a legnagyobb eltérés mintegy 9 cm.

4. Összefoglalás

A képképző és helymeghatározó szenzorok fejlődésének köszönhetően a mobil térképező rendszerek alkalmazási köre nagy mértékben bővült az elmúlt években. Az optikai szenzorok pozícionálását és tájékoztatást biztosító komplex helymeghatározó rendszer többnyire GPS alapú, melyet inerciális navigációs berendezéssel egészítenek ki. Az INS biztosítja a pozíció számítását GPS jelvesztések esetén, illetve a nagyobb mérési frekvenciának köszönhetően a GPS jelek fogadása közötti szakaszokon. Az INS felelős továbbá a szenzor

helyzetének, térbeli irányának meghatározásáért. Cikkünkben ismertetjük az INS szenzorok típusait és jellemzőit, valamint bemutatjuk egy mobil térképezési tesztmérés eredményeit, melyet Columbusban (USA) végeztünk a Center for Mapping intézetben. A tesztben 4 INS és 3 GPS berendezést használtunk; bemutatjuk a GPS/INS kombinált mérések feldolgozási folyamatát és a Kálmán-szűrővel kapott eredmények hibaelemzését.

Cikkünk áttekintést ad tehát az INS berendezések működéséről, a mobil térképészeten történő alkalmazásáról és a GPS/INS rendszerek adatfeldolgozásáról.

IRODALOM

- [1] *McGlone, J. C.–Mikhail, E. M.–Mullen, R. (Eds.) (2005): Manual of Photogrammetry, ASPRS, pp. 1021-1029*
- [2] *Ádám J.–Bányai L.–Borza T.–Busics Gy.–Kenyeres A.–Krauter A.–Takács B. (2004): Műholdas Helymeghatározás, Műegyetemi Kiadó, Budapest*
- [3] *Farrel, J. A.–Barth, M. (1999): The Global Positioning System & Inertial Navigation, McGraw Hill, New York*
- [4] *Grejner-Brzezinska, D.–Toth, C.–Yi, Y. (2005): On Improving Navigation Accuracy of GPS/INS Systems, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, ASPRS, Vol. 71, No. 4, pp. 377-389*
- [5] *Mader, G. L. (1986): Dynamic Positioning Using GPS Carrier Phase Measurements, Manuscripta Geodaetica, 11(4); 272-277*
- [6] *Mader, G. L. (1992): „Rapid Static and Kinematic Global Positioning System Solu-*

ons Using the Ambiguity Function Technique”, *Journal of Geophysical Research*, 97, 3271-3283

Positioning in Mobile Mapping Systems

Barsi, Á.–Lovas, T.–Tóth, Charles K.

Summary

Due significant advancements of the imaging and positioning sensors, the application area of the mobile mapping systems widely broadened in the last few years. The location data for the optical sensors is provided by GPS. In order to provide coordinates in the gaps when GPS outage happens and to ensure accurate orientation data for the imaging sensors, inertial navigation systems are integrated with the GPS.

This paper reviews the basics of the INS measurements and shows the result of a mobile mapping test which were carried out in cooperation with the Center for Mapping in Columbus (USA). In the tests, 4 INS and 3 GPS units were used; the process of the calculation of the combined GPS/INS solution extended with accuracy analysis is discussed. In summary, the paper gives an overview about the INS technology, its application in mobile mapping and the GPS/INS data processing.

Positionierung in Mobile Mapping System

Barsi, Á.–Lovas, T.–Tóth, Charles K.

Zusammenfassung

Dank der Entwicklung optischen und Positionierungssensoren, die Anwendungen von mobilen Kartierungssystemen haben sich weit verbreitet. Die Positionierung und Orientierung von optischen Aufnahmesystemen ist über komplexe Lagebestimmungssysteme meist mittels GPS, ergänzt mit Inertial-Navigationssystem gewährleistet. Inertial-Navigationssysteme bestimmen die Positionsdaten auch bei Empfangslücken der GPS-Systeme oder dank ihren höheren Frequenz zwischen der GPS-Messungen. Dieser Artikel hat die Grundlagen der INS Messungen, sowie die Ergebnisse den durchgeführten mobilen Kartierungstest zusammengefasst, die durch einer Zusammenarbeit mit dem Center for Mapping in Columbus (USA) zustande kam. In den durchgeführten Campaign wurden 4 INS und 3 GPS Geräte getestet. Die Ablauf der Auswertung kombinierten GPS/INS Messungen und ihrer Genauigkeit sind weitgehend diskutiert.

Der Artikel überblickt die Technologie der INS, seiner Anwendungen beim mobilen Kartierung und kombinierten GPS/INS Messungsauswertungen.

MFTTT FELHÍVÁS

Az MFTTT vezetése megköszöni a 2005. évben felajánlott személyi jövedelemadójának 1%-át, melyet a Társaság a diploma-pályázatokra és egyéb működési költségre használt fel.

A 2006. évi felajánláshoz előre kitöltött nyomtatvány a 48. oldalon található.

Adószámunk: 19815675-2-41

Felhívjuk tisztelt Tagtársaink figyelmét, hogy a Geodézia és Kartográfia szaklap folyamatos küldését csak a tagdíj befizetése ellenében tudjuk biztosítani.

A 2006. évi tagdíjak:

rendes tagoknak (lap juttatással)	4200 Ft
nyugdíjasoknak és diákoknak (lap juttatással)	2700 Ft
nyugdíjas, diák (lap nélkül)	500 Ft
70 év felett díjmentes (lap juttatás nélkül)	